

УДК 621.18

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ НА УЛЬТРАСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА В РОССИИ И МИРЕ

**В. А. Кирьянов<sup>1</sup>, Н. В. Вальцев<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> nvaltsev@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются перспективы разработок энергоблоков на ультрасверхкритические параметры пара, анализируются их преимущества и ограничения, рассматривается текущее состояние разработок в России.

**Ключевые слова:** ультрасверхкритические, КПД, жаропрочные сплавы

## PROSPECTS FOR CREATION OF ULTRA-SUPERCRITICAL STEAM PARAMETERS POWER UNITS IN RUSSIA AND IN THE WORLD

**V. A. Kiryanov<sup>1</sup>, N. V. Valtsev<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Ural Federal University named after the First  
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> nvaltsev@mail.ru

**Abstract.** The article discusses the prospects for the development of power units for ultra-supercritical steam parameters, analyzes their advantages and limitations, and examines the current state of the development in Russia.

**Keywords:** ultra-supercritical, efficiency, high-temperature alloys

Во второй половине прошлого века в России на уровне лучших мировых образцов были созданы энергоблоки сверхкритического давления (СКД) с параметрами пара перед турбиной 24 МПа и 540 °С. На СССР и страны Варшавского договора приходилось 40 % от общемировой доли энергоблоков СКД [1]. Они продолжают эксплуатироваться, хотя во многом устарели. Так, КПД конденсацион-

ных пылеугольных энергоблоков России составляет 32–38 %, стран ЕС — 35–43 %. Кроме того, энергоблоки СКД выбрасывают в атмосферу значительный объем вредных веществ [2].

По мере вывода подобного генерирующего оборудования из эксплуатации оно должно заменяться новым, более современным и экологичным. И если газовые энергоблоки могут замещаться ПГУ, то для замены угольных важно заметно повысить их КПД, что может быть достигнуто благодаря совершенствованию тепловой схемы, основного и вспомогательного оборудования и, главное, повышению параметров пара перед турбиной. При повышении параметров пара со стандартных  $p_0 = 25$  МПа,  $t_0 = 545$  °С до  $p_0 = 30$  МПа,  $t_0 = 700$  °С КПД энергоблока увеличится примерно на 4,2 %. Оптимизация тепловой схемы и совершенствование основного и вспомогательного оборудования позволят повысить КПД еще на 2,4 % [2]. Не стоит забывать, что одновременно сократятся и удельные выбросы вредных веществ в атмосферу.

Максимальный достигнутый уровень параметров пара за котлом составляет 30 МПа и 600–620 °С, для увеличения  $t_0$  до 700–750 °С необходимо использовать жаропрочные никелевые сплавы. Исследования возможностей создания энергоблоков на ультрасверхкритические параметры (УСКП) ведутся в разных странах мира (информация приведена в таблице).

Таблица

Проекты создания установок УСКП по странам [1]

Страна	Температура пара, °С	КПД нетто, %	Год начала программы	Год ввода демонстрационной установки	Мощность, МВт
ЕЭС	700	Более 50	1998	2021	500
США	760	45–47	2000	2021	600
Япония	700	Более 50	2008	2021	600
Китай	700	46–50	2011	2021	660
Индия	700	Более 50	2011	2020	800

Основные усилия направлены на разработку и испытания материалов для энергоблоков УСКП, в т. ч. в виде поверхностей нагрева в работающих котлах СКД. По результатам проектов рекомендованы к применению для высокотемпературных элементов сплавы: 263, 282, 617, 740, 740Н.

Основная проблема при создании установок УСКП связана с чрезвычайно высокой стоимостью жаропрочных сплавов при умеренном выигрыше в эффективности энергоблока. Максимальная достижимая температура пара за котлом с применением сплава типа IN740 составляет порядка 750 °С, при этом стоимость подобных сплавов, по данным исследований, достигает 70 долл. за кг и выше при стоимости низколегированной стали — 2–3 долл. за кг, а аустенитной — 7–10 долл. за кг [3].

Сегодня работы по европейскому проекту AD-700 приостановлены. Причиной стала высокая стоимость, не оправдывающая повышение экономичности и снижение выбросов вредных веществ. Учитывая текущие тенденции в развитых странах по отказу от угольной энергетики и недавние заявления ведущих энергомашиностроительных корпораций по прекращению новых проектов строительства угольной генерации [4], можно сказать, что подобные энергоблоки, видимо, реализованы не будут. Судьба их в Китае и Индии пока представляется более оптимистичной.

В России, в свою очередь, с 2014 г. началась проработка проекта создания энергоблока на УСКП. Предложены несколько конструкций котлов для подобного энергоблока. На рис. 1 показаны проекты разработки ВТИ [2] и МЭИ [5].

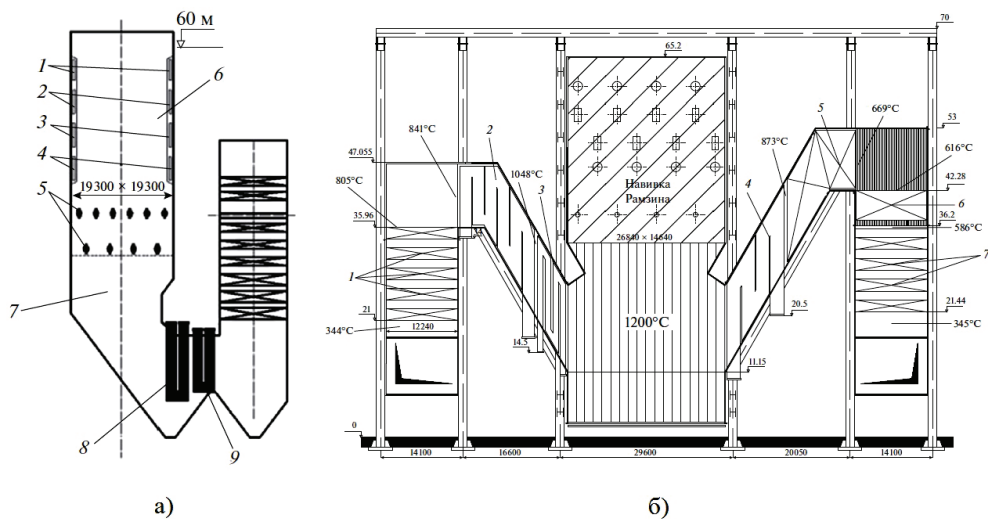


Рис. 1. Пылеугольные котлы на сверхкритические параметры пара:  
а) по проекту ВТИ; б) по проекту МЭИ

В проекте учитываются как опыт разработки котла по проекту AD-700, так и отечественный опыт при создании энергоблока СКР-100 с параметрами пара 30 МПа и 650 °С. Благодаря этому в новом котле элементы пароперегревателя с температурой среды, равной 650 °С, предлагается сделать из стали марки ЭП-184, а выходные пакеты пароперегревателей — из сплава на основе никеля. Инвертная компоновка топки позволяет разместить коллекторы перегретого пара близко к паровпускным патрубкам турбины и сократить длину дорогих паропроводов из никелевых сплавов, устраняя таким образом главный недостаток европейского проекта котла.

Однако существенным ограничением создания подобного отечественного энергоблока является отсутствие жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для работ в подобных условиях. Единственной близкой разработкой является создание в 80-е гг. прошлого века сплава ХН55 МВЦ для проекта атомной установки с высокотемпературным газовым реактором.

В то же время толстостенные элементы типоразмером 152×26 мм, выполненные из стали ЭП-184, прошли проверку в течение 200 тыс. ч на установке 60-ОП ТЭЦ ВТИ и в течение 40 тыс. ч на энергоблоке СКР-100 Каширской ГРЭС и могут успешно использоваться при температуре пара перед турбиной до 650 °С. Перспективной является и сталь 10Х9К3В2 МФБР, находящаяся в стадии освоения [2]. Кроме того, в этом случае проблема сокращения длины дорогостоящих паропроводов становится неактуальной, и котел может быть выполнен традиционной компоновки.

По этой причине для дальнейшего развития и совершенствования отечественной угольной теплоэнергетики представляется целесообразным разработка угольного энергоблока на параметры пара 32 МПа, 650 °С, что позволит, опираясь на имеющиеся опыт и технологии, существенно повысить КПД без чрезмерных затрат.

#### **Список источников**

1. Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants / ed. A. Di Gianfrancesco. Cambridge : Woodhead Publishing, 2017. 875 p.
2. Пылеугольные энергоблоки на супер- и ультрасверхкритические параметры пара: обзор / А. Г. Тумановский [и др.] // Теплоэнергетика. 2017. № 2. С. 3—19.

3. Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO<sub>2</sub>) Based Power Cycles / ed. K. Brun, P. Friedman, R. Dennis. Cambridge : Woodhead Publishing, 2017. 422 p.

4. Proctor D. Siemens, Toshiba Pulling Out of Coal-Fired Generation [Electronic resource]. URL: <https://www.powermag.com/siemens-toshiba-pulling-out-of-coal-fired-generation/> (date of access: 03.12.2020).

5. Прохоров В. Б., Чернов С. Л., Киричков В. С. Разработка схемы ступенчатого сжигания угля в инверторной топке энергоблока мощностью 1000 МВт // Теплоэнергетика. 2017. № 9. С. 58–63.